

IDF ホームページ / <https://www.fil-idf.org/publications/ファクトシートより>

IDF Factsheet 009/2019-12

IDF ファクトシート 2019年12月

## 膜濾過を用いた乳タンパク質濃縮物および分離物の製造

膜処理は固形分の濃縮、タンパク質の濃縮、細菌の分離または除去に広く適用されている分離技術である。乳タンパク質分離物は、通常、優れた加工安定性や栄養機能が必要な製菓、スポーツ、臨床栄養等の特殊なアプリケーションで使用される。

### 膜ろ過

膜ろ過は、乳成分（脂肪球、カゼイン、ホエイタンパク質、乳糖、牛乳ミネラル）を物理的に分離し、選択的に濃縮するために乳業業界で広く用いられている処理技術である。

これらの成分間の比率を変化させることで、特定の組成、機能性を有する液体または粉末状の原料を得ることが可能となる。

膜処理は、バクテリアや芽胞の除去、牛乳やホエイの脱脂、タンパク質の濃縮や分離、部分的な脱ミネラル、固形分の濃縮や水分の回収の目的でも乳製品の処理に広く適用されている分離技術である。

### ろ過工程はどのように働くのか

酪農乳業技術に適用される膜分離

Pore size (micron)	0.0001	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100
Mol Wt (D)	0.1k	1k	10k	100k	500k		
Particle characteristic	ionic		molecular	macromolecular	cellular +	microparticulate	
Separation Process	RO	NF	UF		MF		
Application	Traditional dairy process – side streams Separation of low molecular weight cpds 'clean-up' applications			Macro milk component separation New thinking on milk processing?			
Milk Components	Water - ions - soluble salts - whey proteins - micellar casein - colloids						

図1：膜技術を使用した牛乳成分の物理的分離



# 国際酪農連盟日本国内委員会

Japanese National Committee of International Dairy Federation



IDF ホームページ / <https://www.fil-idf.org/publications/ファクトシートより>

ろ過プロセスは圧力駆動で行われ、クロスフロー方式では供給液は膜の表面に平行に流れ、透過液は流れの方向に対して垂直に送液される。膜の特性、処理設備の設計、濃縮係数、供給液の特性が、ファウリングによる二次ろ過層の形成傾向等、分離の挙動や工程の処理能力に影響する。乳業で使用される膜は、その材料や設計（チューブラー式セラミック、スパイラル式有機膜等）、特定の分画分子量（MWCO）による成分阻止能、公称細孔径に基づいて区別される。図1は各乳成分の分離に対する膜の選択について示している。

## 膜の性能

典型的な逆浸透（RO）膜は分画分子量約150 Da未満であり、約98%のNaClを阻止する。RO処理では設備内で浸透圧よりも大きな圧力（通常 $> 3$  MPa）を与え、膜を通して水分子を保持液側から透過液側に強制的に移行させて濃縮物を得る。乳成分は、製品の特性（浸透能、粘度、ファウリングのしやすさ、前処理等）や膜特性（圧力の上限、フィードスパーサーの構成等）によって、固形分30%超まで濃縮可能である。

ROの進化形であるナノ濾過（NF）も高圧濾過プロセスであるが、通常は2~2.5MPaの範囲で運転される。ROとは異なり、NF膜は通常150~300Daの範囲の分画分子量となるが、分画分子量500~800Daも用途によって利用されることがある。ナノ濾過でもROと同等の固形分濃度レベルまで濃縮可能である。ただし、特定のイオン種、主に一価のイオンである $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ および $\text{K}^+$ の部分的な枯渇または分布によって濃縮率が影響される場合がある。NaClの除去率は約40~60%が一般的だが、 $\text{MgSO}_4$ および乳糖の除去率は98~99%であり、低分子量成分もNF濃縮中に一部抜けることを示唆している。

限外ろ過（UF）は通常は1MPa未満で操作される低圧ろ過プロセスであり、操作条件はプラント構成、ハウジングあたりの膜の数、および直列に接続された膜の中間ブースターポンプの有無に依存する。通常、UFの分画分子量は1~500 kDaの範囲であり、高分子のサイズに基づいて分離されるが、乳の場合、通常、タンパク質は膜を通過できない。10 kDa（ポリエーテルスルホンPES）UF膜が乳製品業界で主に使用され、さまざまな乳タンパク質および乳清タンパク質画分の製造に使用されており、乳糖、非タンパク態窒素、可溶性ミネラル等のより小さな分子量の成分はミルク/ホエイパーミエートとして知られている副産物として、膜を通して選択的に透過される。

精密ろ過（MF）は、もともとセラミック（アルミニウム/チタン酸化物）膜でのみ利用可能であったが、膜全体の圧力損失（すなわちファウリング）を制御するための均一な膜間圧力システムの使用から、勾配透過性を促進するための手段としての膜の再構築まで、日進月歩で進化してきた—商業的には「GP」およびisoflux™セラミック膜と呼ばれることが多い。さらに、特別な構成のスパイラル型高分子MF膜が乳製品用途に使用される事例も増えてきている。乳業で使用される精密ろ過膜は細孔径が0.08~2 $\mu\text{m}$ の範囲であり、主に細菌数を減らすために使用され、最近では、ホエイタンパク質などの可溶性成分を分画してミセル型カゼインを選択的に濃縮するために使用されている。

IDF ホームページ / <https://www.fil-idf.org/publications/ファクトシートより>

## ダイアフィルトレーション

膜ろ過の重要なステップは、タンパク質濃縮物および分離物の製造に不可欠なプロセスであるダイアフィルトレーション (DF) である。DFの間、膜プラント内のさまざまな段階で水が順次追加され、濃縮された保持液を希釈して粘度を下げてファウリングダイナミクスを変更させて透過流束を改善することで、残留透過性成分を透過させる。製品種や設備要因にもよるが、ダイアフィルトレーションの程度によってタンパク質とその他の低分子量成分の最終的な比率が確定する。このファクトシートでは、UFとMFを行う際のDFの使用が乳タンパク質濃縮物 (MPC) と分離物 (MPI) の製造に重要であるため説明した。

## 乳タンパク質の濃縮と分離

乳タンパク質は、UFまたはMF膜を使用して選択的に濃縮される (図2)。主な乳タンパク質であるカゼインはミセル状で存在し、ホエイタンパク質、非タンパク態窒素化合物、乳糖、ミネラルを含む可溶性相内にコロイド状に懸濁している。膜孔径や分画分子量に応じて、選択的にタンパク質が濃縮される。MF膜 (約0.1~0.2 μm) に代表される大きめの孔径の膜を使用すると、ホエイタンパク質の一部 (設備設計により65~95%) を膜から透過させることができ、それによってミセラーカゼインを含む保持液とホエイタンパク質を含む透過液が作成される。この場合、得られた保持液はミセラーカゼイン濃縮物/分離物 (MCC / MCI) と呼ばれる。これら濃縮物はチーズミルクの標準化、ヨーグルトや固形状の乳製品、スポーツ栄養、医療栄養製品等、カゼインとホエイタンパク質の比率変更に着目したアプリケーションにて使用される。

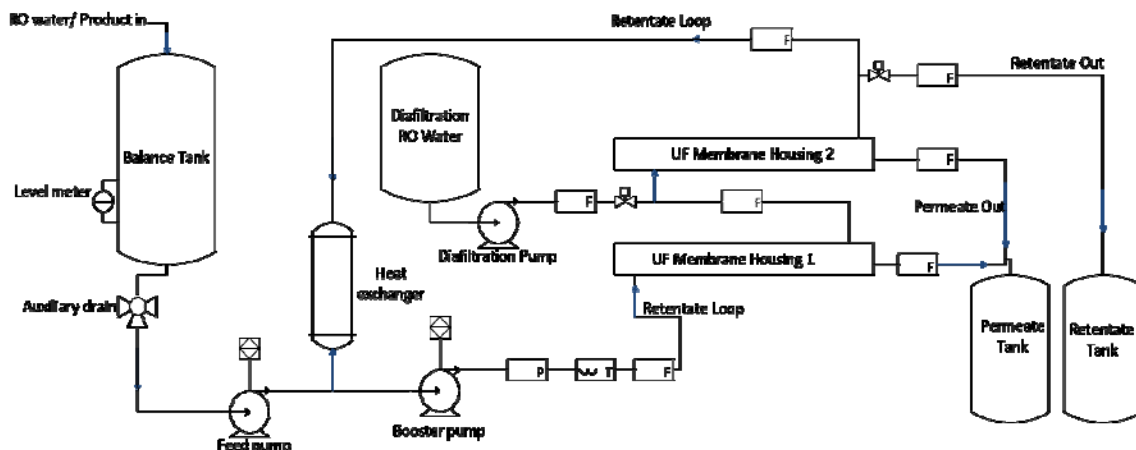


図2. 乳タンパク濃縮物製造向けに「直列」に接続された膜モジュールとダイアフィルトレーション水の連続添加工程を含む一般的な限外濾過 (UF) 設備構成

従来の乳タンパク質濃縮物は、一般的にUFにDF工程を組み合わせる製造される。DF率が高いほど、最終製品における固形分中タンパク質比率が高くなる。UFの間、脱脂乳中のカゼインとホエイタンパク質の比率は維持されるが、乳糖、非タンパク態窒素、および可溶性ミネラルは膜を透過する。乳中のコロイド性ミネラルは濃縮中に保持液側に残るため、コロイド性イオンと血清性イオンの比率が変化することに注意する必要がある。乳タンパク質濃縮物の固形分中タンパク質割合 (PDM) は40%~87% (w /



# 国際酪農連盟日本国内委員会

Japanese National Committee of International Dairy Federation



IDF ホームページ / <https://www.fil-idf.org/publications/> ファクトシートより

w) である。タンパク質の値が90%PDMに近いものは「分離物」と称される。タンパク質含有量の増加に伴い可溶性成分が減少する（表1参照）。

表1. 乳タンパク質濃縮物および分離物のタンパク質最小量（%）および脂肪、乳糖、灰分、水分の最大量（%）。（American Dairy Products Institute ; ADPIより）\*

Product	Protein (min)	Fat (max)	Lactose % (max)	Ash % (max)	Moisture % (max)
MPC40	39.5	1.25	52.0	10.0	5.0
MPC42	41.5	1.25	51.0	10.0	5.0
MPC56	55.5	1.50	36.0	10.0	5.0
MPC70	69.5	2.50	20.0	10.0	6.0
MPC80	79.5	2.50	9.0	8.0	6.0
MPC85	85.0	2.50	8.0	8.0	6.0
MPI	89.5	2.50	5.0	8.0	6.0

(\*）タンパク質含有量≥85%のものは乾燥重量ベース、その他は当該製品あたり。

## 乳タンパク質濃縮物および分離物のアプリケーション

UF を使用して製造された MPC は、製品のタンパク質含有量の標準化あるいはタンパク質強化製品の開発等に利用される。タンパク質とミネラルの比率は機能特性に影響し、特に溶解性、熱安定性、その他加工特性に影響する<sup>1, 2, 3</sup>。熱処理、濃縮、乾燥、保管等を含む濃縮物の加工履歴は機能性、特に再水和性に影響する<sup>4, 5</sup>。濃縮物の熱履歴の指標は、還元後に存在する可溶性ホエイタンパク質の量で表すことができるが、これは総タンパク質 1 グラムあたりで報告される必要がある<sup>6</sup>。前述のように、濃縮中のダイアフィルトレーションの程度はコロイド性および可溶性カルシウムの比率に影響し、溶解液のイオン組成などの還元条件を調整することでその比率はさらに変化する<sup>2</sup>。還元原料を噴霧乾燥した場合、フレッシュな液状濃縮物よりも加熱臭、段ボール臭が強くなる<sup>7</sup>。

乳タンパク質分離物は、通常、例えば、製菓、スポーツ、医療の栄養などの優れた加工特性または栄養機能が必要となる特殊なアプリケーションで使用される。乳タンパク質分離物は高タンパク質、低乳糖であるため、タンパク質強化飲料や食品、低糖の製品向けに優れた原料となる。MF で生成されたミセラーカゼインはミセル性カゼイン比率が高くなっていることを利用し、チーズ向け乳の標準化やカゼイン強化原料の製造に使用される。乳タンパク質濃縮物の熱安定性は、一般に、タンパク質含有量の増加とともに低下する<sup>3</sup>。ただし、MF によってホエイタンパク質を部分的に除去する





# 国際酪農連盟日本国内委員会

Japanese National Committee of International Dairy Federation



I D F ホームページ / <https://www.fil-idf.org/publications/> ファクトシートより

と、超高温殺菌（UHT）飲料アプリケーションでも安定性が向上する可能性がある<sup>8</sup>。膜処理の技術的進歩と組成変化の理解により、食品業界における新規アプリケーション向けの機能性を備えた MPC / MPI の開発が促進される。

## References

1. Sikand, V., Tong, P.S., Roy S., Rodriguez-saone, L.E., Murray, B.A. Solubility of commercial milk protein concentrates and milk protein isolates. *Journal of Dairy Science*, 94:6194-6202 (2011)
2. Crowley, S.V. Desautel, B., Gazi, I., Kelly, A.L., Huppertz, T., O'Mahony, J.A. Rehydration characteristics of milk protein concentrate powders. *Journal of food engineering*, 149:105-113 (2015).
3. Crowley, S.V., Megemont, M., Gazi, I., Kelly, A.L., Huppertz, T., O'Mahony, J.A. Heat stability of reconstituted milk protein concentrate powders. *International Dairy Journal*, 37:104-110 (2014).
4. Gazi, I., Huppertz, T. Influence of protein content and storage conditions on the solubility of caseins and whey proteins in milk protein concentrates. *International Dairy Journal*, 46:22-30 (2015).
5. Eshpari, H., Tong, P.S., Corredig, M. Changes in the physical properties, solubility, and heat stability of milk protein concentrates prepared from partially acidified milk. *Journal of Dairy Science*, 97:7394-7401 (2014).
6. Sikand, V., Tong, P.S., Walker, J. Impact of protein standardisation of milk powder with lactose or permeate on whey protein nitrogen index and heat classification. *Dairy Science and Technology*, 88:105-120 (2008).
7. Carter, B., Patel, H., Barbano, D.M., Drake, M.A. The effect of spray drying on the difference in flavor and functional properties of liquid and dried whey proteins, milk proteins, and micellar casein concentrates. *Journal of Dairy Science*, 101:3900-3909 (2018).
8. Renhe, I.R.T., Corredig, M. Effect of partial whey protein depletion during membrane filtration on thermal stability of milk concentrates. *Journal of Dairy Science*, on line.

翻訳：J I D F 製造技術専門部会（西田 徳親 書記）

編者注: 仮訳の正確性、完全性、有用性等についてはいかなる保証をするものではありません。参考資料として扱い、内容に疑義が生じた場合は英文の原文をご確認ください。